

선호도기반 최적화방법을 이용한 교량의 유지보수계획

Maintenance Planning for Deteriorating Bridge using Preference-based Optimization Method

이선영* · 고현무** · 박원석*** · 김현중****

Lee, Sun-Young · Koh, Hyun-Moo · Park, Wonsuk · Kim, Hyun-Joong

Abstract

This research presents a new maintenance planning method for deteriorating bridges considering simultaneously the minimization of the maintenance cost and maximization of the bridge performance. Optimal maintenance planning is formulated as a multi-objective optimization problem that treats the maintenance cost as well as the bridge performance such as the condition grade of the bridge deck, girder and pier. To effectively address the multi-objective optimization problem and decision making process for the obtained solution set, we apply a genetic algorithm as a numerical searching technique and adopt a preference-based optimization method. A numerical example for a typical 5-span prestressed concrete girder bridge shows that the maintenance cost and the performance of the bridge can be balanced reasonably without severe trade-offs between each objectives.

Keywords : bridge maintenance planning, multi-objective optimization, preference-based optimization, genetic algorithm

요 지

이 논문에서는 교량의 유지보수비용을 최소화할 뿐만 아니라 교량의 성능을 동시에 최대화할 수 있는 새로운 유지보수계획법을 제시한다. 교량 수명연한 동안의 유지보수비용과 교량의 바닥판, 주형, 하부구조의 상태등급으로 표현되는 교량의 성능을 동시에 최적화 하는 다목적 최적화 문제를 구성하여 최적의 유지보수계획을 수립한다. 다목적 최적화문제의 해를 얻기 위한 수치해석 방법으로 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 사용하고, 다목적 최적화방법을 적용하여 얻어진 여러 개의 해집합 중 최적해의 선택을 위한 의사결정(decision making)을 위해 선호도기반 최적화방법을 적용한다. 일반적인 5경간의 PSC I형 교량에 대한 수치예제를 통해, 이 연구에서 제안하는 방법이 유지보수비용 및 교량성능간의 균형 있는 최적화를 이룰 수 있음을 보인다.

핵심용어 : 교량 유지보수계획, 다목적 최적화, 선호도기반 최적화, 유전자 알고리즘

1. 서 론

최적화 방법을 사용한 교량의 유지보수계획법은 교량의 성능지표를 제약조건으로 두면서 교량 유지보수비용을 단일목적 함수(single-objective)로 하여 해를 구하는 방법이 제시되어 왔다(Frangopol 등, 1997, 1999). 이후 비용의 최소화뿐만 아니라, 교량 생애주기 동안 성능유지의 중요성이 부각됨에 따라, 교량의 유지보수비용과 교량의 성능지수들을 각각의 목적 함수로 분리하여 유지보수계획법을 제시하는 다목적(multi-objective) 최적화방법을 이용한 다양한 연구가 진행되고 있다. Miyamoto 등(2000)은 유지보수비용은 최소화하면서 교량의 하중전달능력과 내구성은 최대화하도록 하는 교량의 유지보수 방법을 제시하였다. Furuta 등(2004)은 교량의 생애주기비용은

최소화하는 동시에 교량의 생애주기와 목표안전수준은 최대화하도록 하였다. Liu 등(2005a)의 연구에서는 교량의 유지보수비용과 교량의 성능을 나타내는 상태지수(condition index)와 안전지수(safety index)를 각각 서로 다른 목적함수로 하여 교량의 최적 유지보수안을 제시하였다. 박경훈 등(2006a, 2006b)은 생애주기비용과 교량의 성능을 동시에 고려하는 강교량의 최적 유지관리전략을 수립하는데 있어, 생애주기비용 중 유지보수 간접비용의 추정을 위해서 이용지비용 산출을 위한 시간지체 회귀모델을 제시하였다.

일반적으로 다목적 최적화방법을 적용하여 교량의 유지보수계획 수립 시, 여러 개의 해집합을 얻게 되어, 어떠한 해를 최적의 해로 선택할지에 대한 의사결정(decision making)의 단계가 필요하게 되며, 이는 결국 여러 목적함수들의 상

*정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 · 공학석사 (E-mail : sylee@sel.snu.ac.kr)

**정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 · 공학박사 (E-mail : hmkoh@snu.ac.kr)

***교신저자 · 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 선임연구원 · 공학박사 (E-mail : wpark@sel.snu.ac.kr)

****서울대학교 건설환경공학부 석사과정 · 공학사 (E-mail : hjkim@sel.snu.ac.kr)

대적 중요도를 결정하는 과정이 된다. 목적함수 사이의 상대적인 중요도를 결정하는 가장 고전적인 방법의 하나로서, 상대적 가중치를 도입하는 방법이 있다. 건설기술연구원(2006)의 연구에서는 교량의 상태지수와 신뢰도지수, 간접비를 고려한 교량의 생애주기비용을 서로 다른 목적함수로 고려하여 다목적 최적화문제를 구성하고, 최적해의 산정을 위해 가중치를 도입하는 방법을 사용하였다. 이러한 방법은, 복수의 목적함수들을 가중치를 사용하여 하나의 새로운 통합 목적함수로서 나타낼 수 있고, 최적해는 미리 정한 가중치에 따라 결정될 수 있다. 그러나, 각 목적함수들이 서로 다른 물리량을 가지고 있을 경우에는 목적함수들의 값을 정규화 시키는 과정이 반드시 필요하게 되고, 정규화후에 상대적 가중치를 정하는 과정이 다시 필요하게 된다. 이러한 정규화 과정도 역시 설계자가 설계 결과를 예측하지 못하는 상황에서는 적절히 수행하기에 어려운 점이 있으며, 가중치의 사용도 각 목적함수의 상대적 중요도를 정량적으로 결정해야 하므로 어려움이 따른다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 선호도기반 최적화모형이 제안되었다(Messac 등, 1998; Park 등, 2004). 이 방법에 의하면 서로 다른 물리량을 가지는 목적함수라 하더라도, 각 목적함수의 단계별 경계값에서 동일한 함수값을 사용하도록 선호도함수(preference function)를 정의하여 정규화 효과를 반영함으로써 보다 합리적이며 타당한 해의 선정이 가능하게 된다.

따라서, 이 논문에서는 교량의 유지보수계획을 수립함에 있어 교량의 유지보수비용을 최소화할 뿐만 아니라 바닥판, 주형, 하부구조의 상태등급 등 교량의 성능을 최대화하여 동시에 최적화할 수 있는 다목적 최적화 문제를 구성하고, 선호도함수를 도입하여, 여러 가지의 유지보수계획안 중 하나의 최적 유지보수계획안을 선정하였다.

2장에서는 교량의 유지보수비용을 최소화하고, 바닥판, 주형, 하부구조의 상태등급 등 교량의 성능을 최대화하여 동시에 최적화 할 수 있는 다목적 최적화 문제를 구성한다. 또한, 이 연구에 사용된 교량 상태등급 및 유지보수비용 모형에 대해 설명하고, 최적화문제를 풀기 위한 유전자알고리즘의 적용방법을 설명한다. 3장에서는 다목적 최적화방법을 통하여 얻어진 여러 가지의 유지보수계획안 중 하나의 최적 유지보수계획안을 선정하기 위한 방법으로 선호도함수를 이용한 선호도기반 최적화방법에 대하여 설명한다. 4장에서는 수치예제로 연구에서 제안하는 선호도기반 최적화방법을 이용하여 5경간 PSC I형 교량의 유지보수계획을 제시한다.

2. 유지보수비용 및 성능지수를 고려한 다목적 최적화문제

이 연구에서는 교량의 유지보수계획을 수립함에 있어서 바닥판, 주형, 하부구조의 상태등급과 생애주기 동안의 유지보수비용을 동시에 고려하는 다목적 최적화 방법을 사용하였다. 다목적 최적화 문제는 식 (1)과 같이 구성될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \min\{S_{deck}(R_d(t_d); t)\} \\ & \text{maximize } \min\{S_{girder}(R_g(t_g); t)\} \\ & \text{maximize } \min\{S_{pier}(R_p(t_p); t)\} \\ & \text{minimize } C_M \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $S_{deck}(t)$ 는 시간 t 에 따른 교량바닥판의 성능저하곡선, $S_{girder}(t)$ 는 시간 t 에 따른 교량주형의 성능저하곡선, $S_{pier}(t)$ 는 시간 t 에 따른 교량하부구조의 성능저하곡선, C_M 은 현재 가치화된 교량의 유지보수비용이다. R_d, R_g, R_p 는 최적화 문제의 설계변수로 각각 교량바닥판, 주형, 그리고 하부구조의 유지보수방법을 나타낸다. t_d, t_g, t_p 는 각각 교량바닥판, 주형, 그리고 하부구조의 유지보수시점을 나타낸다. 따라서, 교량 유지보수계획 문제는 유지보수시점(t_i) 및 방법(R)의 수열 $\{R(t_1), R(t_2), \dots, R(t_n)\}$ 을 결정하는 문제로 모델링 할 수 있다.

이 장에서는 이 연구에 사용된 교량 상태등급 및 유지보수비용 모형에 대해 설명하고, 최적화문제를 풀기위한 유전자알고리즘의 적용방법을 설명한다.

2.1 교량의 상태등급모형

최적의 유지보수계획을 찾기 위해서는 먼저 구성요소의 성능저하가 시간의 경과에 따라 어떻게 변화하는지 알아야 하며, 특정시점에서 이루어진 보수보강 등의 조치로 인한 성능의 향상이 성능저하곡선에 반영되어야만 향후의 조치시기를 결정할 수 있다. 이러한 교량의 생애주기 동안의 성능변화를 나타내기 위하여 “도로교 공용수명 연장방안 연구”(건설교통부/시설안전기술공단, 2001)에서 제시한 상태등급 곡선식을 이용하여 유지보수 전후의 상태등급 모형을 식 (2)~(4)에 제시하였다. 상태등급은 교량의 바닥판, 주형(RC주형, PSC주형, 강재주형), 하부구조의 상태를 A~E의 5개 등급으로 나누어 A를 최상의 상태로, E를 최하의 상태로 구분하고 있는데 이를 각각 5~1로 치환하여 상태등급 S의 값으로 나타내었다. 주형의 상태등급 곡선을 나타내는 식 (3)은, 이 논문에서 사용하게 될 PSC 주형(girder)에 대한 것이다. 그림 1에 시간에 따른 상태등급 곡선의 변화를 나타내었는데, 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 유지보수를 수행하지 않은 경우, 상태곡선은 시간이 지남에 따라 지속적으로 감소하며, 유지보수를 수행할 경우 그림 1(b)와 같이 유지보수시점(t_i)에서 상태등급값(S)이 올라간 후 다시 감소하기 시작함을 알 수 있다.

$$S_{deck}(t) = -0.00027502t^3 + 0.00957336t^2 - 0.19328448t + 5 + \sum_{i=1}^{n_1} R_d(t_{d_i}) \quad (2)$$

$$S_{girder}(t) = -0.00017159t^3 + 0.00700464t^2 - 0.16058476t + 5 + \sum_{i=1}^{n_2} R_g(t_{g_i}) \quad (3)$$

$$S_{pier}(t) = -0.00006918t^3 + 0.00331940t^2 - 0.1310441t + 5 + \sum_{i=1}^{n_3} R_p(t_{p_i}) \quad (4)$$

표 1은 건설교통부에서 수행한 “교량관리체계개선에 관한 연구(1999)”에서 제시하는 A~E의 다섯개의 상태등급에 따른 손상 및 조치에 대한 판정기준을 나타낸다. 위의 연구에 따르면, 상태등급이 C등급(S=3)이하의 경우에는 보수조치, D등급(S=2)이하의 경우에는 보강조치, E등급(S=1)이하의 경우에 교체조치를 권장하는 것으로 나타났다. 이는 교량에 관계된 실무자와 전문가를 대상으로 교량의 각 주요 구조요소에 대

표 1. 상태등급에 따른 손상 및 조치에 대한 판정 기준

판정구분	상태
A (S=5)	문제점이 없는 건전하고 양호한 상태.
B (S=4)	경미한 손상, 결함, 열화가 발생하였으나 기능발휘에 지장이 없는 상태로서 적은양의 보수가 필요할 수 있음.
C (S=3)	보통의 손상, 결함, 열화가 발생하였으나 구조적으로는 안전하며 내구성, 기능저하 방지를 위한 보수가 필요한 상태.
D (S=2)	주요부재에 발생한 손상, 결함, 열화로 인하여 내하성능에 지장을 초래할 우려가 있어 통과하중 제한을 검토해야 하며, 시급한 보수 보강이 필요한 상태.
E (S=1)	주요부재에 발생한 손상, 결함, 열화로 인하여 안전성에 위협이 있어 통과하중 제한이 시급한 상태로서, 임시조치 후 사용하여거나 즉각 시설물의 부분 사용금지 또는 보강 개축이 필요한 상태

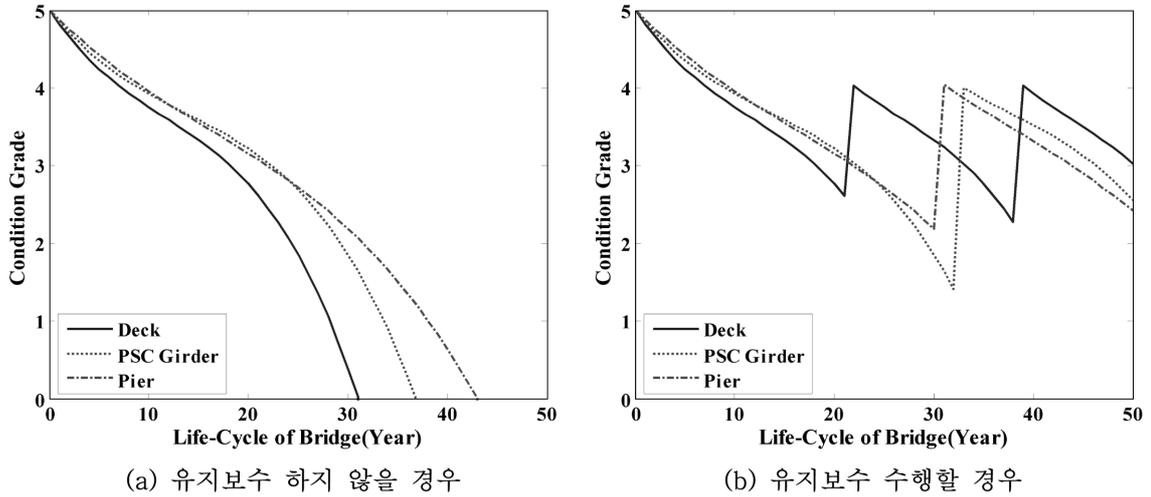


그림 1. 교량의 상태등급곡선

해 보수와 보강조치를 어떤 상태등급에서 취해야하는지에 대한 설문조사에 의한 결과로, 이 연구에서도 상태등급값 S가 3이하의 값을 나타낼 때 보수를, 2이하의 값에서는 보강조치를, 1이하의 값을 나타낼 때는 교체를 하는 것으로 문제를 구성하였다.

2.2 교량의 유지보수비용

사회에 끼치는 유익을 극대화하기 위해 총 생애주기비용을 최소화하는 최소생애주기비용개념이 사용되고 있다. 구조물의 생애주기비용은 건설부터 사용기간 종료까지 기대되는 모든 비용에 대한 현재가치의 합으로서 정의되며 특정 구조시스템이 생애주기를 통하여 유발하는 사회적 비용은 초기 건설비용과 예상되는 손상비용의 합으로 표현할 수 있다. 또한, 교량의 유지보수 시에는 유지보수에 소요되는 직접비용 이외에 교량의 유지보수로 인하여 당초에 의도되었던 교량의 기능을 발휘하지 못하게 됨으로써 간접비용이 발생한다. 따라서, 교량구조물의 총 생애주기비용에는 교량의 계획단계에서 해체시점까지 소요되는 모든 비용이 포함되어야 하나, 이 연구를 통해서 주목하고자 하는 것은 교량의 절대적 생애주기비용이 얼마인지 산정하는 것이 아니라, 유지보수비용과 교량의 성능을 동시에 고려하는 교량의 유지보수계획 수립 시에 직면하게 되는 의사결정(decision making)의 단계에서, 교량관리자의 관리의도를 반영하여 보다 합리적이며 타당한 하나의 해의 선정을 가능하게 할 수 있는 새로운 방법론(선호도기반 최적화방법)을 제시하는 것이 목적이므로 생애주기비용함수를 정의하는 데 있어서 실제비용에 포함되는 모든 비용요소를 포함 시키지 않고, 교량의 직접 유지보수비용만

을 고려하여 단순화하여 표현하였다. 따라서, 생애주기 동안 교량의 총 직접 유지보수비용은 할인율을 고려하여 현재 가치화하여 다음의 식 (5)와 같이 계산 하였다.

$$C_M = \sum_{i=1}^N \frac{C_{t_i}}{(1+\nu)^{t_i}} \tag{5}$$

여기서, C_M 은 유지보수조치에 의해 현재 가치화된 누적(유지보수)비용, t_i 은 유지보수조치가 행해지는 시점, C_{t_i} 은 유지보수조치에 의한 t_i 에서의 실제 유지보수비용, ν 는 할인율을 나타낸다.

이 연구에서 할인율 ν 과 유지보수조치에 의한 t_i 에서 실제 유지보수비용(C_{t_i})의 단가는 “도로교 공용수명 연장방안 연구”(건설교통부/시설안전기술공단, 2001)에서 제안한 값을 사용하였으며, 유지보수조치에 의한 실제 유지보수비용은 표 2에 나타내었다.

2.3 유전자알고리즘(Genetic Algorithm, GA)과 유지보수 종류

유전자 알고리즘은 자연현상의 진화과정을 모사하여 고안된 방법으로서 주어진 영역 내에서 설계변수들에 따른 목적

표 2. 유지보수비용 단가

	바닥 판	PSC 주형	하부구조
보수비용	95천원/m	109천원/m	137천원/m ²
보강비용	302천원/m ²	275천원/m ²	368천원/m ²
교체비용	368천원/m ²	993천원/m ²	1,393천원/m ²

함수의 적합도(fitness)를 기준으로 최적해를 찾아가는 추계학적 최적화기법(stochastic optimization method)의 하나이다(Goldberg, 1989). 유전자 알고리즘에서 설계변수들은 이에 해당하는 기호열(string)로 할당된 후 이 기호열을 하나의 염색체(chromosome)로 간주하여 적자생존과 자연도태의 과정을 통하여 우수한 염색체, 즉 적합한 최적해를 찾아나간다. 이러한 확률기반 탐색방법인 유전자 알고리즘은 기존의 미적분학에 기초한 알고리즘들과는 달리, 검색영역내의 한 점에서의 미분값 정보가 필요치 않을뿐더러 초기값 자체도 임의적으로 생성하여 계산이 수행되므로 초기값에 대한 해의 민감성을 배제할 수 있으며, 바람직하지 않은 국부해를 찾을 가능성을 상당히 줄일 수 있다. 그리고 함수자체가 이산화되어 있거나 미분이 불가능한 경우에도 유용하게 사용될 수 있다.

다목적 최적화문제의 경우, 최대화 또는 최소화하고자 하는 목적함수가 둘 이상이 됨으로써 여러개의 목적함수들간의 trade-off가 존재하게 되고, 이러한 다목적 최적화문제의 특성으로 인해 탐색에 기반하여 문제를 해결해 가는 유전자 알고리즘이 좋은 해결방안이 될 수 있다. 따라서, 연구에서 제안하는 교량의 유지보수계획 수립 문제에서도 다목적 최적화문제의 해를 구하는 수치해석방법으로 유전자 알고리즘을 이용하였다.

유전자 알고리즘을 다목적 최적화문제에 적용하면 다수의 목적함수를 동시에 최적화함으로써 단일해가 아닌 다수의 해들, 즉 다수의 최적해들이 집합을 이루게 된다. Pareto front라 불리는 이런 다목적 최적값을 찾기 위해, 이 연구에서는 NSGA-II(Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II)를 사용하였다. K. Deb등(2002)이 제안한 NSGA-II는 비지배정렬(nondominated sorting)방법과 혼잡도 거리(crowding distance)개념을 도입하여, 기존의 유전자알고리즘에 비해 엘리트주의를 강화하고 해의 다양성을 효과적으로 유지하는 알고리즘이다.

설계변수는 각 구조요소(바닥판, 주형, 하부구조)의 50년 동안 보수, 보강, 그리고 교체의 3가지 유지보수조치(R)로 기호열로 변환하여 그림 2와 같은 하나의 염색체로서 정의하였다(Liu 등, 2005b). 교량의 유지보수계획 문제는 유지보수시점(t_i) 및 방법(R)의 수열($R(t_1), R(t_2), \dots, R(t_n)$)을 결정하는 문제로 모델링하였다. 그림 2에서 기호열의 1은 보수, 2는 보강, 그리고 3은 교체를 나타내며, 0의 경우는 유지보수를 수행하지 않는 것을 의미한다. 그림 3은 보수, 보강, 교체의 유지보수조치 후 교량상태등급의 변화 예를 나타낸 것이다. 임의의 시간 t 에서 기호열이 "1"을 나타내고, 상태등급 $2 < S \leq 3$ 일 경우에는 보수를 수행하고, 보수후에는 보수효과를 고려하여 상태등급 $S=4$ 의 값을 갖게 된다. 또한, 임

0	1	0	2	3	0	3	1	0	0
1	2	3	4	5	6		47	48	49	49
YEAR	YEAR	YEAR	YEAR	YEAR	YEAR	YEAR	YEAR	YEAR	YEAR

그림 2. 유지보수조치 시간계획 GA 기호열 표기 예

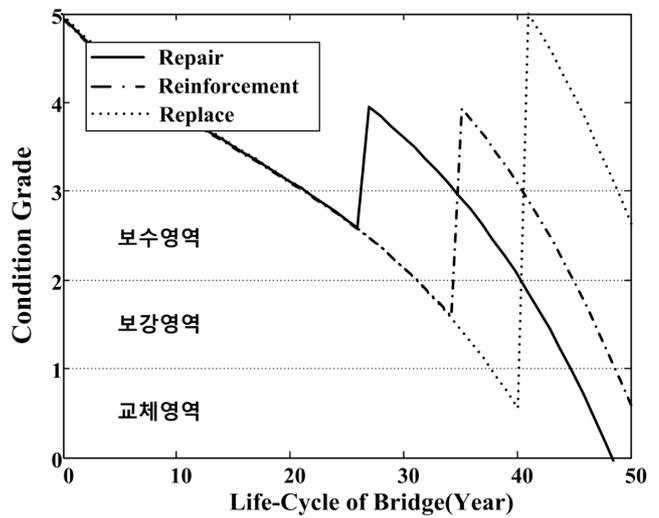


그림 3. 유지보수조치 후의 교량상태등급의 변화

의 시간 t 에서 기호열이 "2"를 나타내고, 상태등급 $1 < S \leq 2$ 일 경우에는 보강을 수행하고 보강 후에는 보강효과를 고려하여 상태등급 $S=4$ 의 값을 갖게 된다. 그리고, 기호열이 "3"을 나타내고, 상태등급 $0 < S \leq 1$ 일 경우, 교체를 수행하고 상태등급 $S=5$ 가 되도록 하였다.

3. 선호도기반 최적화문제

2장에서 보인바와 같이 교량의 유지보수계획을 식 (1)과 같은 다목적 최적화문제(multi-objective optimization)로 구성하면 바닥판, 주형, 하부구조의 상태등급과 교량의 유지보수비용등 서로 다른 특성을 갖는 복수의 목적함수들을 동시에 고려하게 된다. 다목적 최적화문제에서는 어느 하나의 유일한 최적해가 존재하는 것이 아닌 여러 가지 다른 해의 집합 - 파레토(Pareto) 최적 집합이 존재하게 된다. 따라서, 관리자의 입장에서는 구해진 최적해들을 상호 평가하고 검토하여 최종적으로 시행할 유지보수계획을 수립하는 의사결정(decision making)과정이 필요하게 되며, 이는 결국 여러 목적함수들의 상대적인 중요도를 결정하는 과정이 된다.

이 연구에서는 목적함수들의 상대적인 중요도를 고려하기 위한 방법으로 선호도기반 최적화방법을 이용하였다. (Messac 등, 1998; Park 등, 2004). 선호도기반 최적화 방법에 사용되는 선호도함수는 그림 4와 같이 하나의 목적함수에 대하여 '바람직한 정도'의 개념을 사용하여 설계자의 선호도를 정량적으로 표현하는 방법이다. 그림 4에서는 바람직한 경우 선호도함수의 값이 그렇지 않은 경우의 함수 값보다 작은 값을 가지도록 함으로써 최소화 문제로 구성한 예를 나타내고 있다. 즉, 최적화문제의 목적함수로서 그림 4와 같은 선호도함수를 사용하면 선호도함수값을 최소화 시키는 해가 설계자가 가장 원하는 해가 된다.

그림 4에서 λ_i 는 i 번째 목적함수 값을 나타내고 f_p 값은 그에 상응하는 선호도함수 값이다. c_{i_1} , c_{i_2} 및 c_{i_3} 값은 선호도 경계 값으로서, 각 목적함수의 물리적인 값에 따라 설계자가 미리 정하는 값이 된다.

이 연구에서 선호도 범위는 설계자의 선호도가 가장 높은 '바람직함(desirable)'의 I단계($\lambda_i \leq c_{i_1}$)로부터 '허용가능

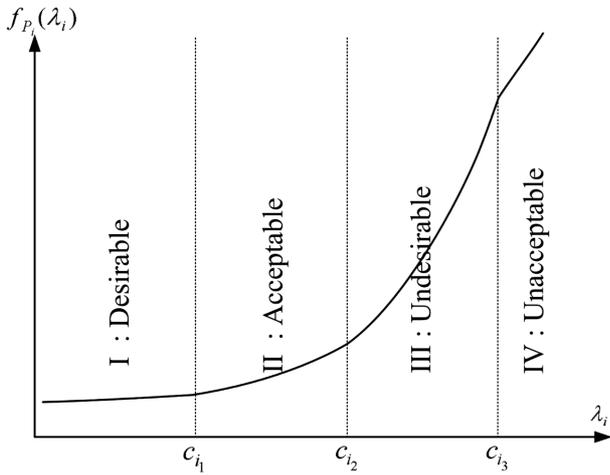


그림 4. 선호도함수의 예

(acceptable)'의 II단계($c_{i_1} \leq \lambda_i \leq c_{i_2}$), '부적당함(undesirable)'의 III단계($c_{i_2} \leq \lambda_i \leq c_{i_3}$), 그리고 선호도가 가장 낮은 '채택불가(unacceptable)'의 IV단계($c_{i_3} \leq \lambda_i$)까지 4개의 구간으로 나누었다. I단계~III단계 구간의 값은 모두 해로 허용 가능하지만, IV단계구간에 있는 값은 해로 사용이 불가능하다.

선호도함수를 도입하여 각 목적함수 값의 상대적 중요도가 정규화되어 최적화에 고려되는 과정은 다음과 같이 설명할 수 있다. 우선 각 목적함수 값 λ_i 를 그림 4와 같이 선호도함수를 사용하여 선호도 값 f_{P_i} 로 나타낼 때, 선호도의 각 단계별 경계에서의 함수값 f_{P_i} 를 모든 목적함수에서 동일한 값을 갖도록 선호도함수를 구성한다. 이렇게 함으로써, 목적함수 별로 서로 다른 물리량 λ_i 들이 동일한 기준을 갖는 선호도 값 f_{P_i} 로 매핑(mapping)되어 정규화 효과를 가지도록 할 수 있다. 또한, 각 목적함수들이 상대적인 중요도를 일반 가중치 방법과 같이 상대적 비의 값을 통해 직접적으로 표현하는 것이 아니라, 각 개별 목적함수의 선호도를 통해 간접적으로 반영하도록 문제가 구성된다. 이러한 상대적 중요성의 간접적인 표현은, 직접적인 가중치 표현 방법의 실제 적용에 있어 목적함수간의 상대적 중요도 값을 구체적으로 정하기 어려운 점을 고려할 때 매우 합리적이며 유연한 설계법이 된다. 예를 들어, 설계자는 '교량의 유지보수비용은 얼마 이하여야 하며, 교량 하부구조의 최소상태등급은 어느 정도면 바람직할 것이다'라는 식의 각 목적함수별 목표를 정하는 것은 비교적 용이하지만, 교량의 유지보수비용이 교량 하부구조의 최소상태등급에 비해 얼마나 더 중요한 목표인지를 정량적으로 정하는 것은 쉽지 않고 정한 값의 의미도 일반적으로 명확하지 않기 때문이다.

이상과 같은 선호도함수를 정의하기 위해서, 다음 식 (6)~(8)과 같은 선호도함수의 성질을 가정한다.

$$\lim_{\lambda_i \rightarrow \bar{\lambda}_i} f_{P_i}(\lambda_i) = f_{P_i}(\bar{\lambda}_i) \text{ for all } \lambda_i, i = 1, \dots, N \quad (6)$$

$$f_{P_i}(c_{i_k}) = f_{P_j}(c_{j_k}) \text{ for all } i \neq j, k = 1, 2, 3 \quad (7)$$

$$f_{P_i}(c_{i_{k-1}}) = \alpha f_{P_i}(c_{i_k}), \alpha \gg 1, i = 1, 2 \text{ and } k = 1, 2, 3 \quad (8)$$

여기서 f_{P_i} 는 i 번째 선호도함수, λ_i 는 i 번째 목적함수 값, c_{i_1}, c_{i_2} , 및 c_{i_3} 는 i 번째 목적함수의 선호도 경계 값, k 는 선

호도 경계 값의 개수, α 는 각 선호도별 선호도 값 차이를 표현하는 상수이다. 선호도함수의 형상을 결정하는 계수 n_p 를 사용하여, i 번째 선호도함수 f_{P_i} 를 n_p 승의 지수함수로 하고 $f_{P_i}(c_{i_3}) = 1$ 로 가정하면, 식 (6)~(8)을 만족하는 선호도함수는 다음 식 (9), (10)과 같이 유도된다.

$$f_{P_i}(\lambda_i) = \left(\frac{\lambda_i}{c_{i_1} n_p \sqrt{\alpha}} \right)^{n_p} \text{ for } \lambda_i \leq c_{i_1} \quad (9)$$

$$f_{P_i}(\lambda_i) = \left[\frac{n_p \sqrt{\alpha^{k-3}} - n_p \sqrt{\alpha^{k-4}}}{c_{i_k} - c_{i_{k-1}}} (\lambda_i - c_{i_{k-1}}) + n_p \sqrt{\alpha^{k-4}} \right]^{n_p} \text{ for } c_{i_{k-1}} \leq \lambda_i \leq c_{i_k}, k = 2, 3 \quad (10)$$

식 (9)와 (10)에서 정의된 선호도함수를 사용하여 다목적 최적화문제는 총 N 개의 각 목적 함수별 선호도함수 f_{P_i} 의 총합 F_P 의 최소화 문제로 정의되는 다음과 같은 선호도 기반 최적화 문제로 표현 할 수 있다.

$$\text{Minimize } F_P(\lambda) = \sum_{i=1}^N f_{P_i}[\lambda(\mathbf{d})] \quad (11)$$

여기서 \mathbf{d} 는 설계변수 벡터이다.

식 (11)을 사용하여 2장의 식 (1)에서 제시한 교량의 최적 유지보수계획을 위한 다목적 최적화문제는 다음 식 (12)와 같은 선호도기반 최적화문제로 구성된다.

$$\text{Minimize } F_P(\lambda) = f_P[\min(S_{deck})] + f_P[\min(S_{girder})] + f_P[\min(S_{pier})] + f_P[C_M] \quad (12)$$

4. PSC I형 교량의 유지보수계획 최적화

이 장에서는 제안하는 선호도기반 최적화 방법을 사용하여 프리스트레스 콘크리트(PSC) 교량(그림 5)에 대해서 최적의 유지보수 시나리오를 구한다.

4.1 예제 구조물

예제교량은 총연장 110 m(10 m+3@30 m+10 m)의 5경간 연속교로, 교폭이 9.6 m이다. 교량의 수명연한이 50년인 교량에 대하여 다목적 최적화문제를 구성하고 최적의 유지보수 시나리오를 조사하였다. 교량의 상부구조는 국내 고속도로 교량 중 약 23%에 해당하는 PSC I 형식이며, 주형은 5개의 PSC 주형으로 이루어져 있다. 하부구조는 단주식 직사각형(3 m×2 m) 교각으로 4개의 교각으로 구성되며, 교각의 높이는 10.8 m이다.

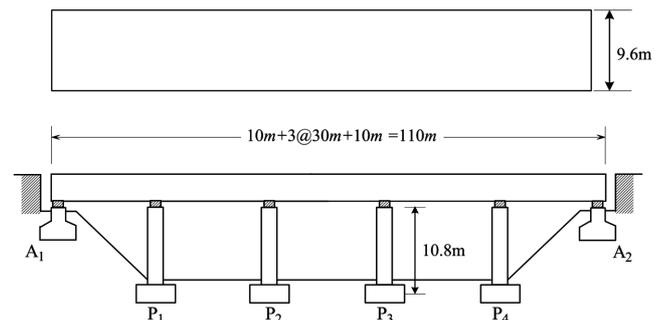


그림 5. 예제교량

4.2 선호도기반 최적화 방법에 의한 최적 유지보수계획

교량의 유지보수계획 수립에 있어서 바닥판, 주형, 하부구조의 최소상태등급을 최대화하는 동시에, 생애주기 동안의 유지보수비용을 최소화하는 최적화 함수를 식 (1)과 같이 구성하여 최적의 유지보수 시나리오를 조사하였다. 이렇게 제안된 다목적 최적화문제를 해결하기 위한 수치해석 방법으로 NSGA-II(Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II)를 사용하였다. 총개체군(N)의 값은 1000, 세대수는 200, 교배와 변이의 분포를 나타내는 지수(K. Deb등, 2002)는 각각 20, 20을 사용하였으며, 개체의 선택에 있어서는 토너먼트 선택방법을 사용하였다. 그 결과, 바닥판, 주형, 교각의 최소상태등급의 값은, 각각 2.27~3.02, 2.22~3.03, 2.07~3.07, 그리고 생애주기 동안의 교량의 유지보수비용은 27백만원~38백만원의 범위의 값을 보였다. 그림 6에 유전자알고리즘을 사용하여 얻은 516개의 최적해 집합을 표시하였다. 그림 6의 가로축은 바닥판, 주형, 교각의 최소상태등급의 합을 세로축은 유지보수비용을 나타낸다. 최소비용이 요구되는 유지보수안의 경우에는 상태등급 값은 가장 작은 값을 나타내어 최저의 성능을 보이나, 최고의 유지보수비용이 사용되는 경우는 최대의 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

이렇게 유지보수비용을 많이 투자 할수록 교량의 상태등급은 향상되지만, 유지보수비용은 무한대로 투자할 수 없으며, 그 비용이 한정되어 있는 것이 대부분의 경우이다. 따라서, 교량 설계자는 여러 가지의 해집합 중에서 정해진 유지보수비용을 만족하면서 교량의 바닥판, 주형, 하부구조 중 어느 구조요소의 성능이 우수한 해를 선택할지, 혹은 유지보수비용을 더 투자하여, 교량의 바닥판, 주형, 하부구조 중 어느 구조요소에 대하여 몇 %의 성능 개선을 얻을 수 있는 해를

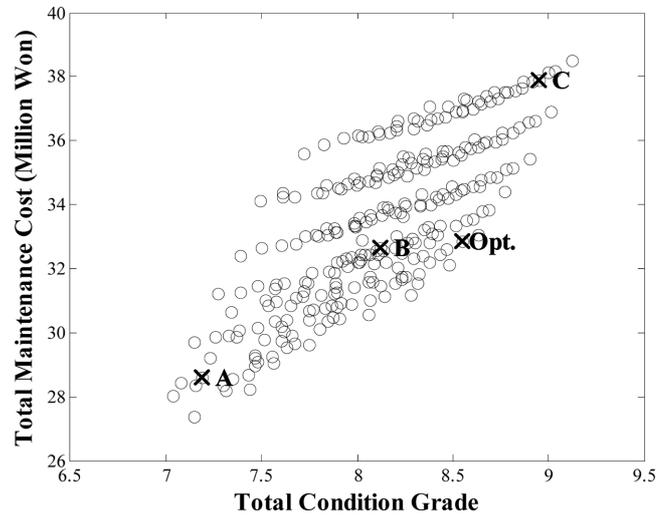


그림 6. 다목적 최적화에 의한 최적해 집합

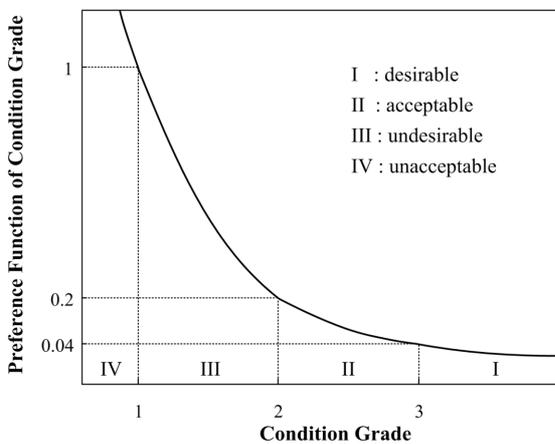
선택할 것인지에 대한 의사결정을 해야만 한다.

수백개의 유지보수안 중에서 보다 합리적이고 타당한 유지보수계획의 선정에 대한 방법으로 선호도기반 최적화 방법을 이용하여 교량의 유지보수안을 선택할 수 있다.

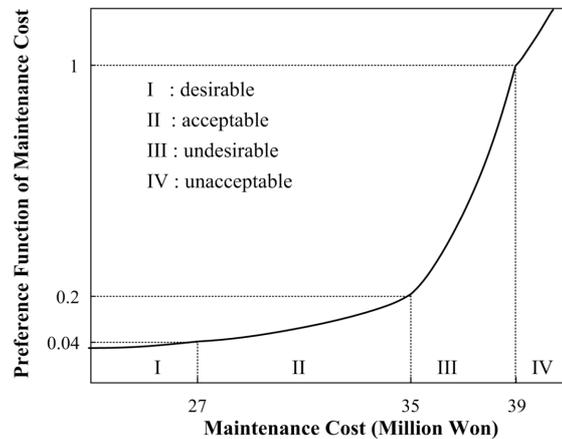
서로 다른 물리량을 갖고 있는 목적함수인 교량의 유지보수비용과 상태등급의 상대적 중요도를 평가하기 위한 방법으로 3장에서 제시한 선호도함수를 이용하여, 각 단계별 경제값에서 동일한 선호도함수값을 사용하도록 하여 정규화 효과를 반영하였다. 이 연구에서는 교량의 유지보수비용과 교량의 바닥판, 주형, 하부구조의 최소상태등급 등, 4개의 선호도 값을 구하여 그 합이 최소인 경우를 최적의 해로 결정하는 식 (12)와 같은 최적화문제로 표현하였다. 이를 반영하기

표 3. 예제에 사용된 선호도함수의 계수 값

		선호도함수의 계수 값				
		c_{i_1}	c_{i_2}	c_{i_3}	α	n_p
교량의 최소상태등급	바닥판	3.0	2.0	1.0	5	2
	주형	3.0	2.0	1.0	5	2
	하부구조	3.0	2.0	1.0	5	2
교량의 유지보수비용 (백만원)		27	35	39	5	2



(a) 상태등급의 선호도함수



(b) 유지보수비용의 선호도함수

그림 7. 해석예제에 사용된 선호도함수

위하여 그림 7과 같은 선호도함수를 생성하였고, 선호도함수 생성에 사용된 계수들의 값은 표 3에 표시하였다. 교량의 바닥판, 주형, 그리고 하부구조의 최소상태등급을 최대화하는 목적함수에 대해서는 최소상태등급이 I(desirable)구간의 값으로 올수록 선호도 경계값(c_{i1})이 커지는 그림 7(a)의 선호도함수를, 현재 가치화된 교량의 유지보수비용을 최소화하는 목적함수 대해서는 유지보수비용이 I(desirable)구간의 값으로 올수록 선호도 경계값(c_{i1})이 작아지는 그림 7(b)의 선호도함수를 사용하였다. 그림 7(a), (b)에 따르면, 목적함수를 나타내는 x 축의 경우 상태등급과 유지보수비용이 절대적 비교가 어려운 서로 다른 값임에도 불구하고, 선호도함수의 값을 나타내는 y 축의 경우 I(desirable)구간과 II(acceptable)구

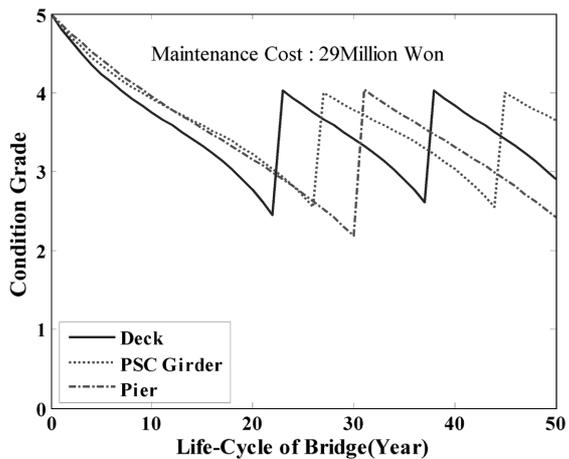
간의 경계에서는 0.04의 값을, II(acceptable)구간과 III(undesirable)구간의 경계에서는 0.2, 그리고 III(undesirable)구간과 IV(unacceptable)구간의 경계에서는 1의 값을 갖도록 함수를 구성함으로써 각 목적함수에 정규화 효과가 반영되어 있음을 확인 할 수 있다.

다목적 최적화방법으로 얻어진 516개의 최적해 중에서 세 가지(A, B, C안)의 유지보수안과 선호도기반 최적화방법으로 얻어진 유지보수안에 대하여 결과를 비교하였다(그림 8, 표 4). 그림 8에서 실선은 교량의 생애주기동안 바닥판 상태등급의 변화를 나타내며, - 선은 주형의 상태등급의 변화를, 그리고 - 선은 하부구조의 상태등급의 변화를 나타낸다.

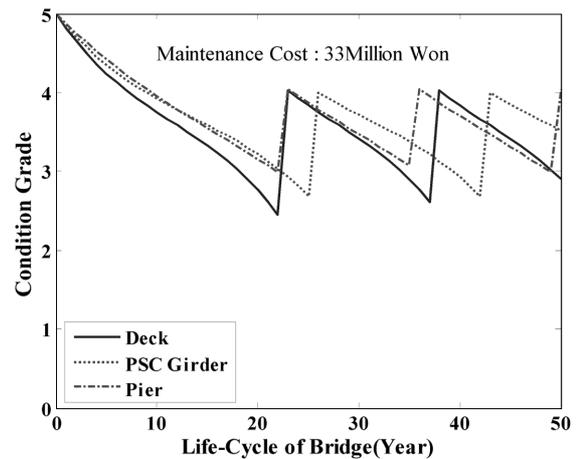
먼저 A의 경우는 A, B, C안 중에서 유지보수비용은 가

표 4. A, B, C 안과 선호도기반 최적화 방법에 의한 교량의 최적 유지보수안 비교

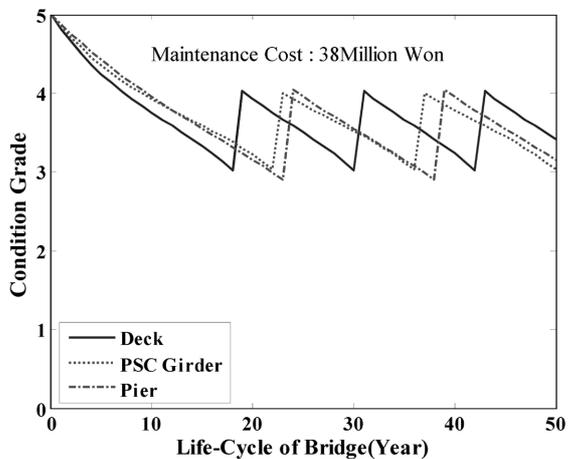
		A	B	C	선호도기반 최적해
교량 상태등급의 최소값	바닥판	2.4528	2.4528	3.0187	3.0187
	주형	2.5441	2.6822	3.0303	2.5441
	하부구조	2.1892	2.9876	2.9009	2.9876
교량의 유지보수비용		28백만원	33백만원	38백만원	33백만원
보수시점	바닥판	24, 39년	24, 39년	18, 30, 42년	18, 30, 42년
	주형	28, 46년	27, 44년	24, 38년	26, 44년
	하부구조	32년	24, 37년	25, 40년	22, 35, 49년



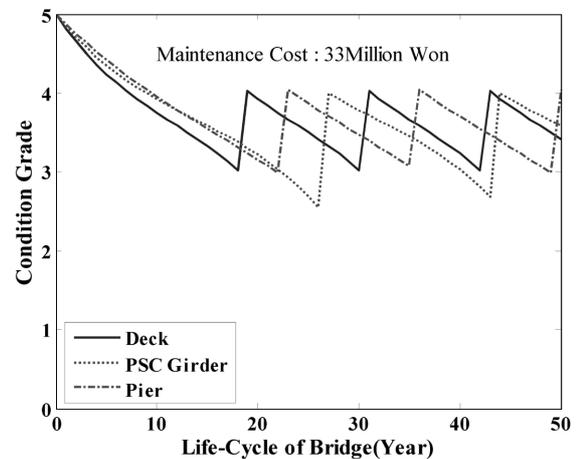
(a) A안



(b) B안



(c) C안



(d) 선호도기반 최적해

그림 8. 교량의 유지보수 시나리오

장 적어 경제적인 면에서는 좋은 방법이지만, 교량의 성능 면에서는 세 가지 방법 중 가장 낮은 성능을 보이는 것을 확인 할 수 있다. B의 경우 A의 약 1.2배에 해당하는 33백만원의 유지보수비용이 필요하다. 하지만, 1.2배의 유지보수 비용으로 교량의 주형, 그리고 하부구조의 최소상태등급은 각각 14.2%과 36.5%의 향상을 보이고 있다. C의 경우, 교량의 바닥판, 주형, 그리고 하부구조의 최소상태등급이 각각 3.0187, 3.0303, 2.9009로 A방법보다 23.0%, 19.1% 그리고 32.5%의 성능의 향상을 보인다. 그러나, 이러한 성능의 향상과 동시에 A방법에 비해 35.7%의 더 많은 유지보수비용이 필요하다. 예제 교량의 경우, A, B, C안 모두 보강이나 교체 없이 보수만으로도 충분히 교량이 성능을 유지할 수 있는 결과를 보인다.

이미 전술한 바와 같이, 이렇게 유지보수비용을 많이 투자할수록 교량이 상태등급은 향상되지만, 유지보수비용은 무한대로 투자할 수 없으며, 그 비용이 한정되어 있는 것이 대부분의 경우이다. 따라서, 수백개의 유지보수안 중에서 보다 합리적이고 타당한 유지보수계획의 선정이 필요하고, 이를 위해 이 연구에서 제안하는 선호도기반 최적화 방법을 적용하여 결정된 교량 유지보수안의 시간에 따른 상태등급 변화가 그림 8(d)와 같다.

선호도기반 최적화방법을 통해 결정된 교량의 유지보수계획은 바닥판은 18년과 30년, 42년의 세 번에 걸친 보수를 수행하고, 주형은 26년과 44년의 두 번의 보수, 그리고 하부구조는 22년, 35년, 49년에 세 번의 보수를 수행하는 것이다.

최종 최적화 값을 표 5에 나타내었는데, 교량바닥판의 최소상태등급은 3.0187으로 4개의 선호 구간 중 I(desirable)구간에 속하며, 교량의 주형, 하부구조의 최소상태등급과 교량의 유지보수비용은 각각 2.5441, 2.9876, 33백만원으로 세 개의 목적함수의 최적해는 II(acceptable)구간에 속하고 있음을 알 수 있다.

선호도기반 최적화방법에 의한 유지 보수안은 B안과 비슷한 규모의 유지보수비용이 사용됨에도 불구하고, 바닥판의 경우는 23.1%의 성능이 향상되고, 하부구조의 최소상태등급은 B안과 같은 값이 된다. 그리고, 주형 상태등급의 최소값은 B안보다 작지만, 그 범위는 모두 II(acceptable)구간에 있게 된다.

따라서 제안하는 선호도기반 최적화 방법의 경우, 서로 상충하는 목적함수들 중 어느 특정한 목적함수가 과도하게 희생되지 않으면서도 교량관리자의 의도를 반영하여 교량의 유지보수비용과 교량의 상태등급이 균형을 이룰 수 있는 최적의 유지보수계획안을 제시함을 알 수 있다. 연구에서 제시하

는 최적해 이외에도 교량의 중요도나 교량유지보수를 함에 있어 어느 구조요소에 우선순위를 두는지에 따라 선호구간의 변화 등을 통하여 다른 최적유지보수안의 선택이 가능하다.

5. 결 론

성능이 저하되고 있는 교량구조물에 대한 최적 유지보수계획을 수립하기 위한 새로운 방법을 제시하였다. 이 연구에서는 교량의 유지보수계획 수립 시, 교량의 유지보수비용을 최소화 할뿐만 아니라 교량의 바닥판, 주형, 하부구조의 상태등급 등 교량의 성능을 최대화하여 동시에 최적화 할 수 있도록 교량의 유지보수비용과 교량의 성능지수들을 각각의 목적함수로 분리하여 다목적 최적화 문제를 구성하고, 다목적 최적화방법을 통해 얻어진 수백여개의 유지보수안 중에서 보다 합리적이고 타당한 유지보수계획의 선정을 위한 방법으로 선호도함수를 사용하는 선호도기반 최적화 방법을 이용하여 교량의 유지보수계획을 제시하였다.

선호도함수(preference function)를 도입함으로써 서로 다른 물리량을 갖는 유지보수비용과 상태등급간의 상대적인 가중치 문제를 해결하였다. 이 연구에서는 교량의 유지보수비용과 교량의 바닥판, 주형, 하부구조의 상태등급의 4개의 선호도 값을 구하여 그 합이 최소인 경우를 최적의 해로 결정하였다.

연구에서 제안하는 선호도기반 최적화방법의 효율성을 검증하기위한 수치예제로 PSC I형 교량의 유지보수계획을 제시하였다. 설계변수는 교량의 각 구조요소(바닥판, 주형, 하부구조)의 50년 동안의 3가지(보수, 보강, 교체)의 유지보수 조치로 하였다. 다목적 최적화 방법으로 수백개의 해집합이 존재함을 확인할 수 있었다. 교량 관리자에게는 여러 가지의 해집합 중에서 정해진 유지보수비용을 만족하면서 교량의 바닥판, 주형, 하부구조 중 어느 구조요소의 성능이 우수한 해를 선택할지, 혹은 유지보수비용을 더 투자하여, 교량의 바닥판, 주형, 하부구조 중 어느 구조요소에 대하여 몇 %의 성능 개선을 얻을 수 있는 해를 선택할 것인지에 대한 의사결정이 단순한 문제가 아니다. 그러나, 제안하는 선호도기반 최적화 방법을 사용할 경우, 서로 상충하는 목적함수들 중 어느 특정한 목적함수가 과도하게 희생되지 않으면서도 교량관리자의 의도를 반영하여 교량의 유지보수비용과 교량의 상태등급이 균형을 이룰 수 있는 최적의 유지보수계획안을 얻을 수 있음을 확인하였다. 연구에서 제시하는 최적해 이외에도 교량의 중요도나 교량유지보수를 함에 있어 어느 구조요소에 우선순위를 두는지에 따라 선호구간의 변화등을 통하여 다른 최적유지보수안의 선택이 가능하다.

표 5. 선호도기반 최적화 방법에 의해 얻어진 교량의 최적 유지보수계획

		최종 최적해	선호구간			
			I	II	III	IV
교량 상태등급의 최소값	바닥판	3.0187	●			
	주형	2.5441		●		
	하부구조	2.9876		●		
교량의 유지보수비용 (백만원)		33		●		

감사의 글

이 연구는 서울대학교 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업 및 안전하고 지속가능한 사회기반건설사업단을 통한 Brain Korea 21의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부/시설안전기술공단(2000) **도로교의 공용수명 연장방안 연구**, 연구보고서, 건설교통부
- 건설기술연구원(1999) **교량관리체계개선에 관한 연구**, 연구보고서, 건설교통부
- 박경훈(2006) **생애주기 성능 및 비용에 기초한 강교량의 실용적 최적 유지관리모형**, 박사학위논문, 한양대학교
- 박경훈, 공정식, 황윤국, 조효남(2006a) **생애주기 성능 및 비용에 기초한 교량 유지관리기법 개발**, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제6A호, pp. 1023-1032.
- 박경훈, 이상윤, 김정호, 조효남, 공정식(2006b) **강교량의 최적 유지관리 시나리오 선정모델**, **한국강구조학회 논문집**, 한국강구조학회, 제18권, 제6호, pp. 677-686.
- 박관순, 함대기, 고현무(2005) **생애주기비용 최소화에 의한 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물의 통합최적설계 및 비용효율성 평가**, **한국지진공학회 논문집**, 한국지진공학회, 제9권, 제2호, pp. 17-27.
- 박원석, 박관순, 고현무(2006) **선호도 기반 최적화 방법을 사용한 복합 구조 제어 시스템 설계**, **2006년도 한국지진공학회 학술대회 논문집**, 한국지진공학회, pp. 401-408.
- 한국건설기술연구원(2006) **강교량의 최적설계와 경제적 유지관리를 위한 LCC분석 기법 및 시스템 개발**, 건설교통연구개발사업 연구보고서, 건설교통부/한국건설교통기술평가원
- Frangopol, D.M., Lin, K.-Y., and Estes, A.C. (1997) Life-cycle cost design of deteriorating structures, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 10, pp. 1390-1401.
- Frangopol, D.M., Enright, M.P., Gharaibeh, E., and Estes, A.C. (1999) Towards optimal reliability-based bridge maintenance planning, *Case Studies in Optimal Design and Maintenance Planning of Civil Infrastructures System*, ASCE, Reston, VA, pp. 73-88.
- Futura, H., Kameda, T., Fukuda, Y., and Frangopol, D.M. (2004) Life-cycle cost analysis for infrastructure systems: life-cycle cost vs. safety level vs. service life, *Life-cycle Performance of Deteriorating Structures: Assessment, Design and Management*, ASCE, Reston, VA, pp. 19-25.
- Goldberg, D.E. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading Mass
- Kalyanmony Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal and Meyarivan, T. (2002) A fast and elitist multiobjective genetic algorithm : NSGA-II, *IEEE Transactions on evolutionary computation*, Vol. 6, pp. 182-197.
- Liu, M. and Frangopol, D.M. (2005a) Multiobjective maintenance planning optimization for deteriorating bridges considering condition, safety, and life-cycle cost, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 5, pp. 833-842.
- Liu, M. and Frangopol, D.M. (2005b) Bridge annual maintenance prioritization under uncertainty by multiobjective combinatorial optimization, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 20, pp. 343-353.
- Liu, M., Hammad, A., and Itoh, Y. (1997) Multiobjective optimization of bridge deck rehabilitation using a genetic algorithm, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 12, pp. 431-443.
- Messac, A. and Wilson, B.H. (1998) Physical programming for computational control, *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 2, pp. 219-226.
- Miyamoto, A., Kawamura, K., and Nakamura, H. (2000) Bridge management system and maintenance optimization for existing Bridges, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 15, pp. 45-55.
- Park, K.-S. and Koh, H.-M. (2004) Preference-based optimum design of an integrated structural control system using genetic algorithms, *Advances in Engineering Software*, Vol. 35, pp. 85-94.

(접수일: 2007.10.22/심사일: 2007.12.28/심사완료일: 2008.2.19)